

引文格式: 张东升, 罗永健, 廖日程, 等. 激光散斑和红外在整流罩无损检测中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(20): 63-69, 91.
ZHANG Dongsheng, LUO Yongjian, LIAO Richeng, et al. Study on shearography and thermography in nondestructive testing for fairing parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(20): 63-69, 91.

激光散斑和红外在整流罩无损检测中的应用研究*

张东升¹, 罗永健², 廖日程², 叶益民¹, 张 涛¹, 叶成炯¹

(1. 上海大学, 上海 200444;
2. 国营长虹机械厂, 桂林 541002)

[摘要] 采用激光散斑和红外技术对纤维增强树脂基复合材料整流罩壳体内部缺陷进行了检测。激光散斑与红外热成像是基于不同物理原理的非接触式光学无损检测方法, 在对构件表面进行热辐射条件下, 可以使用这两种技术同时对构件的内部缺陷进行无损检测。提出了一种激光散斑干涉的融合算法, 扩展光学相机动态范围, 满足整流罩高光洁度表面的检测需求, 同时介绍一种基于低成本红外热成像检测的图像增强算法。针对某型飞行器整流罩, 利用热激励方式分别利用这两种技术开展了检测。检测结果表明, 提出的激光散斑融合算法可以有效地消除激光照射整流罩表面引起的光强亮度不均带来的噪声, 红外位相图像增强技术获得了清晰的缺陷图像。在整流罩检测中, 两种测试技术各有优势, 通过实际应用, 对两种技术进行了评价, 为后续的缺陷检测提供了经验。

关键词: 红外热成像; 激光散斑; 整流罩; 无损检测; 图像分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.20.063



张东升
教授, 研究方向为光测力学测试技术。

随着技术的进步, 我国的航空航天技术取得了举世瞩目的成就。整流罩是飞行器的重要结构之一, 它在飞行过程中保护飞行器内部的关键部件免受气动力、气动加热及声振等有害环境的影响, 同时维持飞行器良好的气动外形, 有效减小气动阻力^[1]。纤维增强树脂基复合材料是以纤维作为增强体, 树脂为基体形成的复合材料, 具有质量轻、强度高的优势, 同时能够透射电磁波, 已经成为现代飞行器的首选结构材料^[2]。然而, 复合材料内部的缺陷会显著降低整流罩构件的强度和刚度, 影响飞行器结构的完整性, 其质量问题不可忽视^[3]。

目前整流罩内部的缺陷检测技术受到一定限制。常规的复合材料无损检测主要包括超声、CT 等方法。超声技术是利用声波在结构内部的

传导特征, 获得材料内部连续性信息; CT 是采用片层 X 光成像技术构造结构内部的三维影像, 可以直观地发现内部缺陷。然而, 这些技术在应用于小型弹体整流罩检测时, 却存在技术问题, 成功的案例鲜有报道。例如, 郭广平^[4]研发出大型飞机雷达罩的超声无损检测技术, 但其喷水穿透超声扫描结构复杂, 只能针对特定的结构, 普适性较差。同时, 该团队也开展了激光散斑干涉和红外成像等新型无损检测技术在整流罩这类薄壁结构内部缺陷的检测中的探索^[5]。激光散斑干涉基于光学干涉原理, 用于测量结构内部缺陷所引起的表面微小变形^[6-7]; 而红外热成像技术则通过分析热波在结构内部的传播规律, 结合图像分析技术, 可检测出复合材料结构内部缺陷^[8]。虽然它们

* 基金项目: 国家自然科学基金(12072184)。

基于不同的检测原理,但均为非接触全场测量方法,其原理都是通过对物体表面加热后完成物体内部缺陷的检测。如何合理应用这两种技术,实现整流罩快速原位检测是当前的研究热点。Kryukov 等^[9]研究表明,采用激光剪切散斑干涉和主动红外热成像两种无损检测技术对金属黏接接头进行检测,可以检测到大部分黏接结构中的缺陷。与此同时,激光散斑干涉和红外热成像信息融合图像算法也开始出现^[10-11]。

本文采用自行研制的激光散斑和红外热成像检测设备,开展了某型航空器整流罩内部缺陷的检测,结合实际纤维增强树脂基复合材料整流罩特征,探索两种检测技术的适用性,并对检测结果进行分析讨论,证明了新型检测技术的推广具有重要意义。

1 方法及原理

1.1 激光散斑无损检测

在无损检测中使用的激光散斑干涉技术主要采用剪切光路检测,其主要使用的光学部件如图 1 所示。激光经扩束后照射被测物体,物体表面的漫反射相干光经过迈克尔逊干涉光路在相机靶面形成干涉。在机械载荷作用下,物体内部缺陷处会产生应力集中,在物体表面产生局部变形。这个变形虽然很小,但可以使用光学干涉方法检测出来。

时间相移法可以显著提升干涉条纹的对比度,并实现变形的自动解算。以 4 步相移为例(每一步移动 $\pi/2$ 相

位),并采集散斑干涉图像。物体受力前的 4 幅干涉图像的光强表达为

$$\begin{cases} I_{01} = a + b \cos(\varphi) \\ I_{02} = a + b \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \\ I_{03} = a + b \cos(\varphi + \pi) \\ I_{04} = a + b \cos\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 为背景强度; b 为条纹调制度; φ 为随机相位分布。

通过数学运算,变形前散斑相位为

$$\varphi_0 = \arctan \frac{I_{04} - I_{02}}{I_{01} - I_{03}} \quad (2)$$

采用相同的方式,物体变形后的相位为

$$\varphi_1 = \arctan \frac{I_{14} - I_{12}}{I_{11} - I_{13}} \quad (3)$$

最后,代表物体表面变形的相位差为受力前后的位相差为

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = \arctan \frac{I_{14} - I_{12}}{I_{11} - I_{13}} - \arctan \frac{I_{04} - I_{02}}{I_{01} - I_{03}} \quad (4)$$

式中, I_{01} 、 I_{02} 、 I_{03} 、 I_{04} 分别为变形前的 4 幅图像; I_{11} 、 I_{12} 、 I_{13} 、 I_{14} 分别为变形后的 4 幅图像。

应用实时相移技术可提高检测图像的对比度,有利于缺陷的定位和尺寸测量^[9]。在一定时间周期内,给压电陶瓷施加 4 步阶梯变化的直流电压用于精确控制陶瓷的位移,使迈克尔逊干涉仪中一束光波产生给定的相移量,并采集对应的散斑图像,通过对图像逐点相移计算获得位相

条纹。随着光学相机图像分辨率的不断提升,图像像素的增加显著增大了相移计算的运算量。由于相移计算流程未涉及逻辑判断,可以通过在大规模多线程浮点运算处理平台(GPU)上以高并发的计算模式解决这一难题,可大幅度提高实时相移的帧率^[9],满足实时无损检测的需求。

为了减小空气阻力,整流罩曲面具有很高的表面质量,当激光照射物体的表面时,会产生强烈的光强不均匀现象,导致整流罩局部过亮。根据式(1),激光散斑干涉需要使用相干激光束照射物体结构表面以获得物体表面漫反射的干涉位相信息。当出现光强过亮或者光强不足的情况时会导致光强呈现非线性,使后续的相移计算(式(4))产生严重偏差。在检测时需要调节相机的曝光时间和光圈大小用于满足光照条件。然而,对于圆锥形整流罩结构,因表面的曲面形式以及表面粗糙度的原因,会出现物体表面局部反光的情况,导致图像出现过曝光或者欠曝光的情况发生。针对这一问题,本文开发了一种抑制结构表面光强的图像融合算相移技术。因测量过程中激光照明状态不变,可以在每个相移状态下设定多个恒定的曝光度,用来保证在最小的曝光度下图像中无灰度为 255 的像素;而在最大曝光度下图像无灰度为 0 的像素。在相移过程中获得不同曝光状态下的一组图像,若定义曝光次数为 N ,那么, N 幅 8-bit 灰度图像多曝光图像强度之间的位相关系式可表达为

$$I_i^{(1)} = \begin{cases} 255 \\ 0 \end{cases} \alpha_j I_i^{(2)} = \begin{cases} 255 \\ 0 \end{cases} \alpha_2 I_i^{(3)} = \dots = \begin{cases} 255 \\ 0 \end{cases} \alpha_{N-1} I_i^{(N)} \quad (5)$$

式中, α_j ($j=1,2,\dots,N$) 是一系列的常系数。在这 N 幅图像中,虽然对应像素位置的灰度值不同,但在同一幅图像中,除去过曝光(灰度 255)和欠曝光(灰度 0)以外的相邻像素之

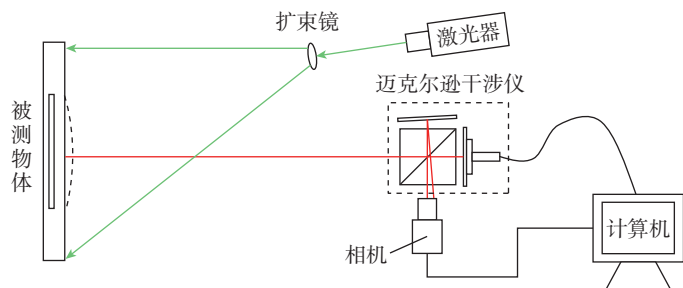


图 1 激光散斑光路示意图
Fig.1 Shearography optical arrangement

间的灰度关系是相同的。可以采用图像融合的形式,剔除 N 幅图像中过曝光和欠曝光的像素灰度,并利用相邻像素之间的灰度关系恢复一幅高动态的灰度图像。为了兼顾融合效果和计算效率,图像融合采用一种平均融合算子,即

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_i^{(k)} \quad (6)$$

通过对不同相移步长的散斑图像进行相同的融合处理,再结合式(4)进行相移计算,可以消除由于整流罩表面光照不均匀所引起的位相畸变,一次性获得完整的激光散斑干涉位相。以上方法的应用,大大提高了激光散斑无损检测技术对各种曲面和高反射表面的检测能力,结合并行计算技术实现实时相移,促进了技术的实用化^[12]。

1.2 红外热成像无损检测

红外热成像无损检测技术是以红外辐射原理为基础,利用激励源对物体表面进行加热,通过红外相机记录的温度差异探测物体内部缺陷^[6]。由于外部热激励的热流一般是均匀的,对于无缺陷处,经反射或物体热传导后,其表面的温度场分布基本也是均匀的。物体内部缺陷往往由于材料本身的属性而存在差异,如隔热性和导热性缺陷。在热传导中表现出表面温度分布不均匀性;由于隔热性缺陷处热量的堆积导致从正面测得该位置的表面温度较高,形成“热点”。而对于内部存在导热性缺陷的物体,热传导一定时间后,正面和背面的温度分布也将不均匀,由于缺陷处传热较快,使得从正面测得的表面温度较低,形成“冷点”。根据物体表面的温度信息即可推导材料的均匀性和材料内部的结构信息,进而对其内部是否存在缺陷做出判断。结合傅里叶位相分析技术,本文使用长脉冲和锁相两种激励方式,开发出红外序列图像分析方法,以获得高质量的红外检测图像。

对于长脉冲激励方式,利用图像预处理方式去除背景噪声,采用傅里叶变换将采集到的一维温度信号逐像素的从时域转化到频域^[13],得到每个像素点的相位数据。

$$\phi_{i,j}(f_k) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N \Delta T_{i,j}(t_n) \cos(2\pi kn / N)}{\sum_{n=1}^N \Delta T_{i,j}(t_n) \sin(2\pi kn / N)} \quad (7)$$

$n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, N$

$$t_n = (n-1)\Delta t, \Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (8)$$

式中, $\phi(f_k)$ 是傅里叶变换后第 k 个频率分量的相位信息; N 为红外序列图像总帧数; $\Delta T(t_n)$ 为 t_n 时刻采集到的温度数据; Δt 是红外热像仪采集间隔; f_s 是红外热像仪的采集帧率。上述方法仅考虑了热量在结构厚度方向的传播效应,但实际的检测物体上热波也会发生横向扩散,此时可采用修正方法消除热波的横向扩散效应对检测结果的影响^[14]。

对于锁相激励方式,利用图像预处理方式去除背景噪声,采用双路锁相相关算法可以有效提取特定频率信号的相位信息,且能够抑制噪声和其他的直流分量^[15]。构建同向参考信号 $R(n)$ 和正交参考信号 $Q(n)$,其中 n 为序列图像索引。同相参考信号和正交参考信号分别与已消除直流分量的热波信号 $T_{ac}(n, i, j)$ 进行运算得到像素点 (i, j) 处的相关输出,再利用式(10)即可求出像素点 (i, j) 的具有较高信噪比的相位值 $\Phi(i, j)$ 。

$$U_{01}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{ac}(n, i, j) \cdot R(n)$$

$$U_{02}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{ac}(n, i, j) \cdot Q(n)$$

$n = 1, 2, \dots, N$

$$\Phi(i, j) = \arctan \left(\frac{U_{02}(i, j)}{U_{01}(i, j)} \right) \quad (10)$$

缺陷的位置可以通过缺陷和无缺陷区域之间的相位差来确定。为

了可视化目的,将相位转换为 8 位图像。线性拉伸是一种常见的方法,它将最大相位定义为 255,最小相位定义为 0。虽然这种变换简单快速,但由于相位数据的截断误差,会导致有关缺陷边缘的一些详细信息丢失,导致图像质量降低。

为了解决这个问题,本研究采用了特殊相位增强策略。首先结合傅里叶分析,将高精度相位图像分割为背景图像和细节图像。前者包含位相图像的低频分量,后者保留位相图像的高频细节。单独对高频细节图像进行处理,以增强缺陷边缘的信息。在对高频细节进行增强时,可以使用边缘保持滤波方式^[16],在保护边缘特征的前提下提升细节部分的权重,再通过融合背景图像和增强细节图像^[17],获得新的重建相位图像,最后量化为 8 位图像,以便于使用局部自适应伽马校正方法进行显示。这种方法可以大大增强缺陷边缘的对比度,提高缺陷的可见性,获得高对比度检测图像。

2 试验

2.1 散斑照明模拟

采用 ESNDD-ILLUM 模型模拟激光照射物体表面的光强存在强反射光斑的情况^[18]。如图 2 所示,在激光照射下物体表面存在一个高亮的圆形区域。当调节相机的曝光量,使高亮区域的光强适中时,周围的散斑图像的亮度值极低,如图 2(a)所示;在这种前提下进行相移处理,在周围区域会引入较大的噪声,如图 2(d)所示;若使周围的亮度适中时,高亮区域的灰度则处于过饱和状态,如图 2(b)所示;在这种情况下进行相移处理,高亮区域则无法获得位相信息,如图 2(e)所示。采用本文提出的高动态亮度调节方法,对图像进行融合,获得的散斑干涉图像如图 2(c)所示,对应的散斑干涉位相如图 2(f)所示。

整流罩的表面形状和表面质量会引起光照不均的问题,在大功率激光照射下尤为明显。以上仿真试验表明,本文提出的高动态散斑融合技术,可以有效地降低由于激光照射物体表面所造成的局部过亮或过暗影,以此获得稳定的干涉条纹位相,保障了激光散斑干涉应对不同物体表面的检测能力。

值得注意的是,在热加载的条件下,随着热量传递可引起物体内部热积累或热传导,物体内部温度诱发物体表面的变形随时间而发生变化。因此,在开展热加载激光散斑干涉检测时,常可以观察到物体表面的条纹随时间缓慢的变化过程。由于相移过程十分短暂(ms级),结合并行计算后的计算耗时很少,通常在实时时间相移中忽略了物体表面缓慢的热变形。在本文的方法中,计算框架与现有的实时时间相移类似,只是在图像采集过程中设定多个恒定的曝光度用于采集多幅图像,这个过程同样十分短暂(ms级),在这一过程中温度变化引起的变形相对缓慢,在短时间内变化非常小,可以不考虑热变形引起的位相变化,即忽略在相同相移步长条件下所采集的多幅不同曝光图像中的热变形。

2.2 整流罩检测

采用上海大学自主研发的 SD-LSI8500 型激光剪切散斑仪和 SD-TI9100 型红外热像无损检测仪开阵列整流罩的检测。SD-LSI8500 型激光剪切散斑仪通过一体化设计,集成热辐射加载、激光投射和干涉功能模块,使用便捷,可降低检测劳动强度,提高了检测效率和检测准确度。相机在 1600 像素×1200 像素分辨率下的图像采集帧率为 36 帧/s,通常情况下的实时时间相移帧率可达 33~35 帧/s,采用本文提出的多曝光融合技术,实时时间相移帧率达到 16~22 帧/s。有效检测面积为 500×500 mm²,激光功率为 400 mW,热加载灯功率为 2000 W。

可检测最小缺陷直径为 3 mm。

SD-TI9100 型红外热像无损检测系统也采用功率为 2000 W 的卤素灯,热加载时间可调,试验时使用的傅里叶红外热像仪,工作波段为 7~14 μm;图像分辨率 640 像素×480 像素;热灵敏度为 40 mK;最大采集帧率为 60 Hz。需要指出的是,为了获得高质量的检测结果,传统的红外无损检测系统主要采用检测罩形式,以避免周围物体热交换形式对检测结果的影响。本文采用了便携式设计方案,可以方便地把检测设备安装在各类测试现场,对构件进行原位测试。

整流罩构件为纤维增强树脂基复合材料,呈圆锥状,厚度约为 3 mm。为了验证激光散斑干涉和红外成像技术对检测对象表面的适应性,试件

表面有两种不同的涂装,如图 3 所示。构件上进行预制人工缺陷,缺陷尺寸数据如表 1 所示。

被测构件放置在光学防振平台上,激光散斑和红外检测系统安装在离试件 1 m 的距离处。使用 2000 W 卤素灯对试件进行热激励,然后分别用激光散斑和红外热成像设备对缺陷进行检测,试验现场如图 4 所示。

为了研究不同热激励形式对红外热成像技术检测结果的影响,在使用红外热成像检测时,使用了长脉冲和锁相两种激励形式,分别获得了对应的红外检测图像,并进行了对比分析。在长脉冲模式下,激励时间为 10 s,采集帧数为 512 帧,采集帧率为 10 Hz;在锁相模式下,激励周期为 20 s,周期数为 3 个,采集帧率为 10 Hz。

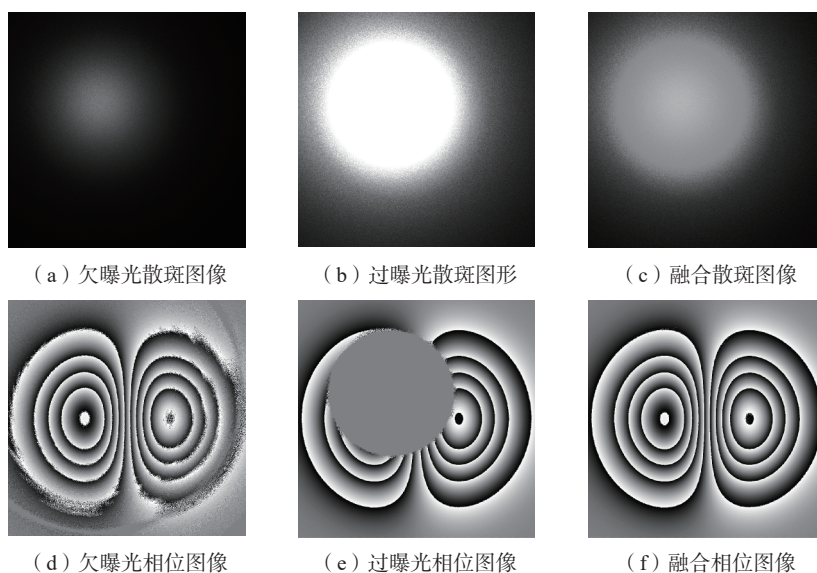


图 2 ESNDT-ILLUM 模拟试验
Fig.2 ESNDT-ILLUM simulation experiment

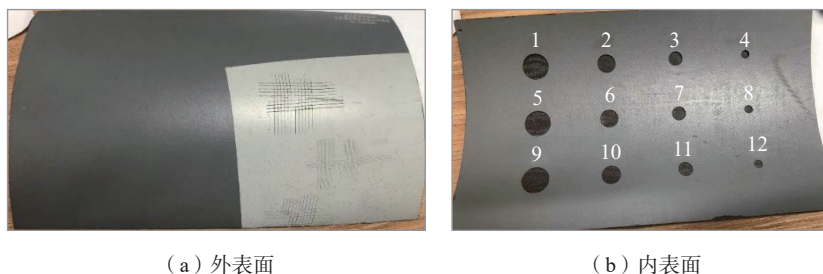


图 3 整流罩构件
Fig.3 Fairing component

2.2.1 激光散斑检测

在红外长脉冲激励后开展激光散斑检测。激光照射下整流罩表面存在局部反光情况,但使用融合图像技术后,干涉条纹图和位相图可以实时显示,如图5所示。可以看出,采用图像融合后,大大降低了激光散斑检测对结构表面的要求,获得了高质量的散斑干涉位相条纹。经过位相去包裹后,可以明显分辨出1~8号缺陷,但较深的9~12号缺陷比较模糊。

2.2.2 红外检测

红外检测结果如图6所示。在采用红外位相图像增强技术后,无论采用长脉冲还是锁相加载方法,全部的预制缺陷均可见。

为了与预制缺陷尺寸(表1)比较,分别对深度为1.5 mm和2.2 mm的两排缺陷的灰度进行定量分析,获得的灰度沿长度方向分布。如图7所示,缺陷处的灰度接近为0时,缺陷边缘具有明显的灰度突变。

3 结果与讨论

本文采用激光散斑干涉和红外成像方法对某型弹体整流罩内部缺陷

陷开展了无损检测探索。为了提升两种测试技术在整流罩检测中的适应性,提出了新型的处理方法。现有的激光散斑干涉测量在遇到被测对象反光问题时,主要采用在被测对象上喷涂哑光涂层,或者调整激光照射角度,把高亮反射区域“移出”被测区域。然而,前者增加了检测的工序,并且某些特定的结构不允许喷涂哑

光涂层;后者在检测平板形构件时有效,但对于回转曲面,无论如何调整激光照射角度,高反差区域始终存在。针对整流罩表面粗糙度低的实际情况,本文提出了抑制表面反光的新型处理技术。通过多曝光散斑融合技术的图像处理方法,可以有效地降低表面反光的影响。模拟试验证明,当表面存在高亮反射区域时,无

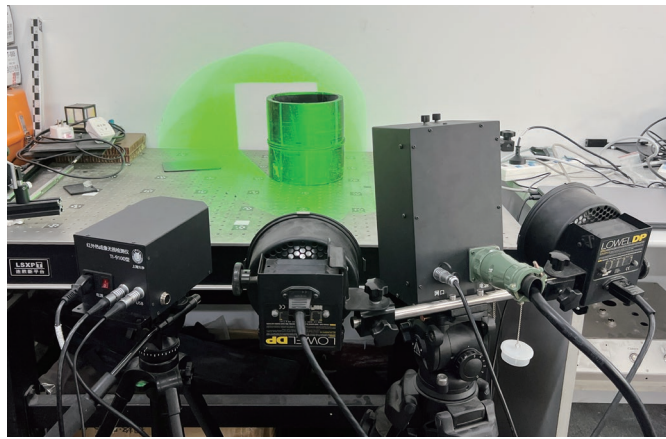
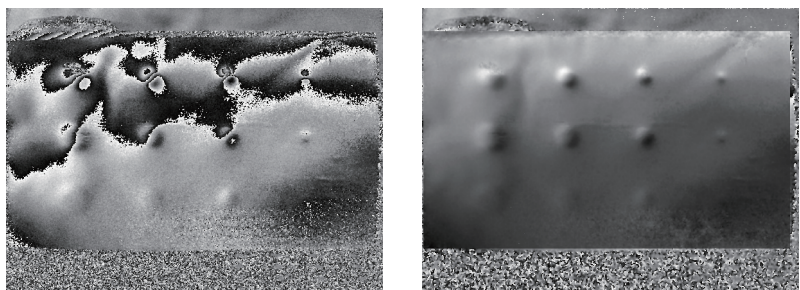


图4 散斑干涉和红外热成像无损检测试验现场图

Fig.4 Experimental arrangement of shearography and infrared thermography NDT



(a) 位相包裹图

(b) 去包裹位相图

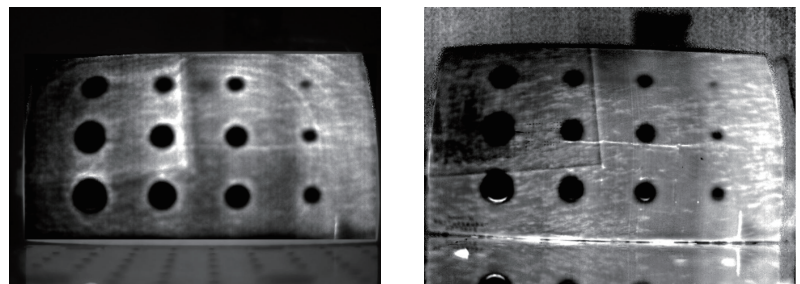
图5 热加载下激光散斑检测图像

Fig.5 Shearography detection image under thermal loading

表1 缺陷尺寸

Table 1 Size of defects mm

缺陷位置	直径	深度
1	18	1.5
2	13	1.5
3	10	1.5
4	6	1.5
5	18	1.7
6	13	1.7
7	10	1.7
8	6	1.7
9	18	2.2
10	13	2.2
11	10	2.2
12	6	2.2



(a) 长脉冲

(b) 锁相

图6 红外检测图像

Fig.6 Infrared detection images

论如何调节相机的曝光度,均无法获得理想的散斑位相;而采用本文提出的图像融合技术,可获得完美的散斑干涉位相图像。在实际测试中,虽然整流罩表面存在两种不同的表面形式,在激光束照射下呈现出不同的亮度,引起亮度的不均匀性,但采用本文提出的图像融合技术,可以获得高质量的散斑干涉条纹图像(图5)。该技术提高了激光散斑干涉技术对各类被测对象表面检测能力。值得注意的是,该技术是一种自适应处理方法,无须人工选取阈值,极大提高了该技术的实用性;另一方面,由于激光散斑干涉无损检测技术基于测量物面的变形,对于刚度较大的物体,如果缺陷处于较深的位置时,缺陷在表面诱导的变形量很小,会降低该方法的检测灵敏度。正是由于这个局限性,在图5中,整流罩中较深的缺陷未能检出。

红外图像的空间分辨率一般较低(512像素×480像素),红外检测获得缺陷边缘一般比较模糊,会导致红外检测的实际效果更加劣化。本文通过把红外位相图像划分为背景和细节层,针对性地对细节图像采用边缘保持滤波,提升代表缺陷边缘的细节成分,再组合成完整的位相图像。相较常规的线性增强、直方图均衡化处理,该技术大大增强了红外检测缺陷的可视度。对于厚度为3mm的整流罩结构,长脉冲和锁相两种激励模式下的红外热成像均可以检测出12个缺陷。作为对比,激光散斑技术只能检测到浅层的缺陷,深度为2.2mm的缺陷只能隐约可见,十分模糊,这是跟两种检测技术的原理密不可分的。整流罩结构采用纤维增强树脂基复合材料,本身的刚度较大,较深的内部缺陷所引起的局部变形非常小,从而导致激光散斑对较深缺陷的检测能力变弱。红外热成像技术基于热量传导原理,对材料的刚度的变化不敏感,更加适用于刚度较

大材质的无损检测。由于热扩散的原因,红外检测的图像往往存在缺陷边缘模糊的问题,对于空间分辨率不高的红外图像,这一关键性技术难题制约了该技术的应用。在本文试验中,由于采用了背景与细节融合的图像增强算法,在两种热激励模式下均可获得较好的图像质量。在图7中,采用长脉冲和锁相激励对不同深度、相同尺寸缺陷进行检测时,直接从图中获得的缺陷尺寸略有差异,例如图7(a)中的缺陷从左到右分别为27mm、20mm、15mm和8mm;图7(b)中的缺陷从左到右分别为19mm、14mm、9mm和5mm。这种差异主要是由于热量的横向扩散引起的,可以通过修正的方法实现缺陷尺寸的精确测量^[14]。

综合比较两种非接触光学无损

检测技术在整流罩缺陷检测中的应用,从检测能力上,红外热成像分析热量的传播规律,不依赖结构的变形,因此相对于激光散斑法它更适用于刚度较大的纤维增强树脂基复合材料结构检测。考虑到各种纤维增强复合材料的热传导系数的差异,在长脉冲和锁相激励中选用的激励时间、图像采集帧率、和采集时间等参数需要仔细选择,以获得高质量检测图像^[19-20]。虽然红外热成像技术可以检测到更深的缺陷,但检测所需要的热激励时间也越长,为了得到图像质量较好的检测结果,所需要采集的图像数目更多,从而导致处理的时间更长,检测效率大大降低。同时红外图像的空间分辨率较低也会影响在大视场条件下对小缺陷的分辨能力。

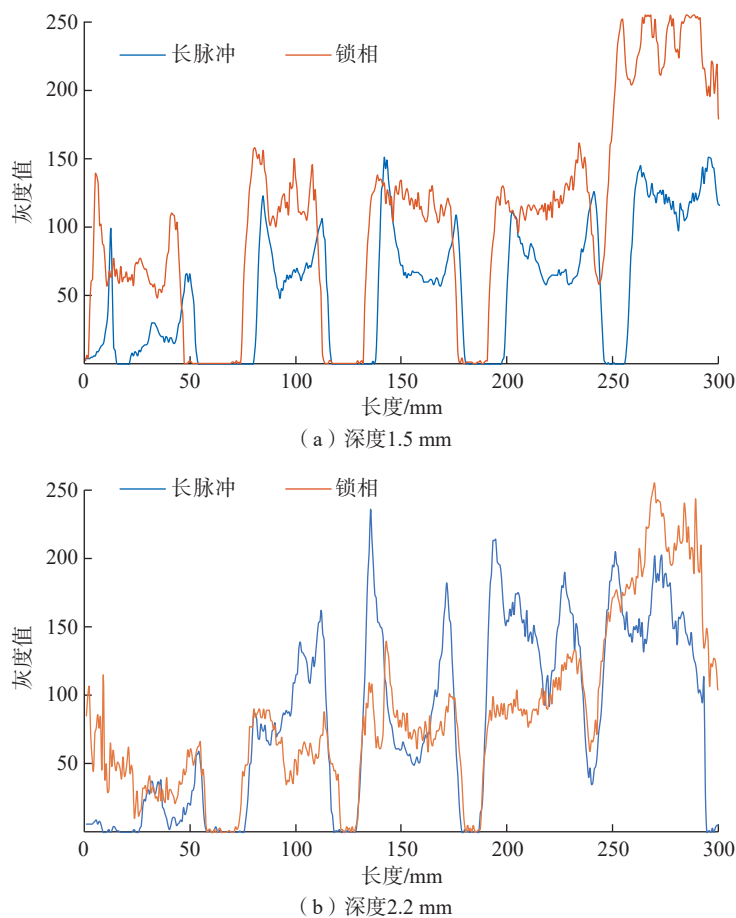


图7 缺陷灰度分布

Fig.7 Greyscale distribution of defects

剪切散斑干涉无损检测技术虽然有多种力学激励形式,但红外热激励是原位测量中最容易实现的激励形式。由于引入了 GPU 并行的计算模式,可以做到实时相移,在热激励结束的时候就可以得到干涉条纹图和相位图,相较于红外热成像,检测的效率较高,检测速度可以达到红外热成像技术的数十倍甚至数百倍以上。但该方法的检测能力受到缺陷诱导的表面变形限制,在热激励条件下往往只能检测到较浅的缺陷,对于刚度较大材料内部深层缺陷漏检率较高。如何结合红外检测和激光散斑检测各自的优势,在降低了缺陷的误检率的同时,提高检测效率仍然是该技术的发展方向。

4 结论

本文采用激光散斑干涉和红外成像对纤维增强树脂基复合材料整流罩壳体内部缺陷的检测方法开展了研究,提出了改善高光洁面激光散斑成像质量的方法,及红外位相图像的增强技术,并应用于某型整流罩缺陷的无损检测,得出以下结论。

(1) 结合散斑图像融合的实时相移技术大大降低了激光散斑干涉对被测构件表面反光性能的要求,可以获得高质量的散斑检测图像,进一步增强了激光散斑干涉无损检测的实用性。

(2) 通过开发新型的红外位相图像增强方式,有效地锐化了红外检测中缺陷的边缘,提升了红外检测的图像质量。

(3) 在外场原位检测中,激光散斑检测和红外长脉冲热波检测可以在一次热激励中同时进行,分别得到对应的检测结果。激光散斑具有较高的检测效率,但受整流罩刚度的影响,容易漏检深层缺陷;红外热成像不依赖材料的刚度,通过实际的参数调节,可以检测到更深的缺陷。

参考文献

- [1] CHERNOBRYVKO M, AVRAMOV K, USPENSKY B, et al. Model of segmentation of rocket fairings due to the action of a cumulative charge[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 183: 04009.
- [2] YANG L N, ZHENG D H, JIN G J, et al. Fabrication and formability of continuous carbon fiber reinforced resin matrix composites using additive manufacturing[J]. Crystals, 2022, 12(5): 649.
- [3] 刘欢, 高建辉, 迟庆新, 等. 航空发动机机筒整流罩断裂原因[J]. 机械工程材料, 2022, 46(4): 89-94.
- LIU Huan, GAO Jianhui, CHI Qingxin, et al. Fracture cause of flame tube fairing in an aeroengine[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(4): 89-94.
- [4] 郭广平. C 夹层雷达罩无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(15): 47-49.
- GUO Guangping. Nondestructive testing for C-sandwich radome[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(15): 47-49.
- [5] 郭广平, 张于北, 刘颖韬. 雷达罩的激光与红外无损检测技术研究[C]// 郑州: 中国力学学会学术大会, 2009.
- GUO Guangping, ZHANG Yubei, LIU Yingtao. Research on laser and infrared nondestructive testing technology of radome[C]. Zhengzhou: Academic Conference of Chinese Society of Mechanics, 2009.
- [6] YE Y M, MA K, ZHOU H, et al. An automated shearography system for cylindrical surface inspection[J]. Measurement, 2019, 135: 400-405.
- [7] JIANG H Y, MA Y H, SU Z L, et al. Speckle-interferometric phase fringe patterns denoising by using fringes' direction and curvature[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 119: 30-36.
- [8] LIU J Y, WANG F, LIU Y, et al. Inverse methodology for identification the thermal diffusivity and subsurface defect of CFRP composite by lock-in thermographic phase (LITP) profile reconstruction[J]. Composite Structures, 2016, 138: 214-226.
- [9] KRYUKOV I, BÖHM S. Prospects and limitations of eddy current shearography for non-destructive testing of adhesively bonded structural joints[J]. The Journal of Adhesion, 2019, 95(9): 874-886.
- [10] THEROUX L D, DUMOULIN J, MALDAGUE X. Non destructive testing by active

infrared thermography coupled with shearography under same optical heat excitation[J]. Geophysical Research Abstracts, 2014, 16: 11819.

[11] WEI Y J, DING L, HAN Y S, et al. Characterizing defects in materials with fusion of thermography and shearography[J]. Measurement, 2021, 182: 109736.

[12] ZHANG T, YE Y M, ZHANG S Q, et al. Accurate and fast speckle interferometry in severe illumination conditions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 154: 107032.

[13] 魏延杰, 何宏军, 周辉, 等. 长脉冲红外无损检测的图像增强技术[J]. 无损检测, 2021, 43(8): 77-80.

WEI Yanjie, HE Hongjun, ZHOU Hui, et al. Image enhancement technology of long pulse infrared nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 43(8): 77-80.

[14] WEI Y J, ZHANG S Q, LUO Y J, et al. Accurate depth determination of defects in composite materials using pulsed thermography[J]. Composite Structures, 2021, 267: 113846.

[15] TANG Q J, DAI J M, BU C W, et al. Experimental study on debonding defects detection in thermal barrier coating structure using infrared lock-in thermographic technique[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 463-468.

[16] GU B, LI W J, ZHU M Y, et al. Local edge-preserving multiscale decomposition for high dynamic range image tone mapping[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2013, 22(1): 70-79.

[17] WEI Y J, SU Z L, MAO S S, et al. An infrared defect sizing method based on enhanced phase images[J]. Sensors, 2020, 20(13): 3626.

[18] BALCAEN R, WITTEVRONGEL L, REU P L, et al. Stereo-DIC calibration and speckle image generator based on FE formulations[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(5): 703-718.

[19] ALMOND D P, ANGIANI S L, PICKERING S G. Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2017, 87: 7-14.

[20] ARORA V, MULAVEESALA R, RANI A, et al. Digitised frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive testing and evaluation of glass fibre reinforced polymers[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2019, 34(1): 23-32.

(下转第 91 页)

Impact Damage Characterization of Composite Materials Based on Independent Component Analysis for Infrared Sequences

YUAN Lihua¹, HONG Kang¹, ZHU Yanzhen¹, XI Tengyan¹, LI Zhe²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

[ABSTRACT] The independent component analysis method was used to study the defect characterization problem of composite impact damage based on pulsed infrared images. First, according to the prior knowledge of pulse infrared experiment of test block and the temperature difference between defect and non-defect, the appropriate interval segment was selected for infrared sequence image. Then, centering preprocessing and whitening preprocessing were performed on the constructed data matrix, independent component analysis was performed by gradient descent method, and the independent component feature image can be obtained by reconstructing the matrix. Finally, by choosing an appropriate image segmentation method, the defect characterization quantities of the maximum damage long diameter and damage short diameter can be obtained. Taking the damage defect extraction of two carbon fiber reinforced composite laminates with different thicknesses under the impact energy of 30 J and 40 J, as an example, the maximum damage long diameter and damage short diameter of impact damage were successfully extracted and compared with the results of ultrasonic F-scan. For comparison, the errors are within an acceptable range, especially for the laminate with a thickness of 2 mm, which errors are within 5%. The research results showed that independent component analysis can effectively distinguish noise from defects, and the obtained feature image has higher signal-to-noise ratio, greater contrast and better image quality than the original image, which is beneficial to the extraction and characterization of defects.

Keywords: Independent component analysis; Pulse infrared nondestructive testing; Composites material; Impact damage; Image segmentation

(责编 晓月)

(上接第 69 页)

Study on Shearography and thermography in Nondestructive Testing for Fairing Parts

ZHANG Dongsheng¹, LUO Yongjian², LIAO Richeng², YE Yimin¹, ZHANG Tao¹, YE Chengjiong¹

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State-Owned Changhong Machinery Factory, Guilin 541002, China)

[ABSTRACT] In this paper, shearography and thermography have been used in detecting inner defects of the fiber reinforced resin matrix composite fairing shell. Shearography and infrared thermography are contactless nondestructive testing methods based on distinct disciplines. Under the same thermal excitation, these two methods are able to be applied to nondestructive testing. In this study, an image fusion technique has been proposed to expand the dynamic range of digital camera to meet the requirement for smooth surface of the fairing shell. Based on a low-cost thermography setup, a phase enhancement scheme has also been developed for on-situ nondestructive evaluation. Shearography and infrared thermography have been conducted on the fairing by means of thermal excitation. The experimental results show that the proposed fusion method is helpful in dealing with the uneven distribution of light intensity due to laser illumination and surface condition; and the infrared phase enhancement scheme greatly improves the visibility of defects. These two methods possess individual advantages. Based on the experiment, an assessment about these two optical methods is conducted, which provides valuable experiences in subsequent defect detections.

Keywords: Infrared thermography; Shearography; Fairing; Nondestructive testing; Image analysis

(责编 晓月)